

Analisis Kebutuhan *Limited Slip Differential (LSD)* pada Mobil Formula Sapuangin Speed 6 di Ajang *Student Formula Japan (SFJ)*

Khalikul Haqqur Rahman dan I Nyoman Sutantra

Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Corresponding Author: tantra@me.its.ac.id

ARTIKEL INFO

Informasi Artikel

Artikel masuk :

Artikel revisi :

Artikel diterima :

Kata Kunci

Clutch Plate LSD, Limited Slip Differential (LSD), Ramp Angle LSD, Sapuangin Speed 6, Skid/Roll.

ABSTRAK

Perkembangan teknologi pada mobil semakin banyak. Salah satunya *Limited Slip Differential (LSD)*, yang diaplikasikan pada sistem *powetrain* dari mobil. Ketika mobil berbelok dan salah satu roda kehilangan gaya normalnya maka mobil akan mengalami guling, kemudian roda yang menempel di jalan akan kehilangan traksinya. Maka dari itu perlu adanya analisa kebutuhan LSD terhadap *power*, torsi dan kecepatan yang dapat disalurkan pada setiap variasi *locking percentage*. Dalam penelitian ini, analisa perhitungan dilakukan berdasarkan FBD mobil pada saat berbelok pada lintasan *student formula*. Menghitung kecepatan yang diijinkan, kemudian menghitung kecepatan yang harus ditempuh, selanjutnya analisa skid dan guling, dan yang terakhir menghitung *Road-Load Horse Power (Rhp)*, Torsi roda saat berbelok yang dapat disalurkan oleh LSD pada salah satu roda. Perhitungan pada analisa ini diberikan variasi *clutch plate* (0011/60%, 0101/100%) dan variasi *ramp angle* (90°/0%, 60°/29%, 50°/42%, 45°/51%, 40°/60%, 30°/80%) yang dilakukan pada *skidpad* (R=8,55m), *hairpin turns* pada *autocross* dan *endurance* (Rmin=4,5m) serta pada *constant turns* pada *autocross* dan *endurance* (R=11m-27m). Dari analisa radius kritis (*hairpin turns*) yang dipengaruhi LSD didapatkan hasil penggunaan LSD akan optimum pada *locking percentage* LSD terbesar, ketika mobil SAS 6 melaju dengan kecepatan 18,37 m/s, akan menyebabkan roda mobil terangkat maksimal pada *hairpin turns* radius 4,5 m dengan sudut angkat 17,999°. Dan ketika tidak menggunakan LSD (LP=0%) maka tenaga mobil (Rhp) adalah 0 watt dan menghasilkan kecepatan untuk melaju 0 m/s, serta torsi pada roda bagian luar 3,884 Nm. Ketika menggunakan LSD dengan *locking percentage (LP)* 88%, mobil akan memiliki tenaga (Rhp) sebesar 2477,352 watt yang akan menyebabkan mobil memiliki kecepatan 17,480 m/s dan torsi roda sebesar 17,999 Nm. Dan untuk pemilihan LSD harus memiliki initial torque sama dengan nilai torsi roda pada saat roda mulai terangkat.

PENDAHULUAN

Tahun 2018 ini ITS Team Sapuangin kembali berpartisipasi pada ajang tahunan *Student Formula Japan (SFJ)*, yang tiap tahun diadakan di Shizuoka Stadium, Japan. SFJ merupakan event yang diadakan oleh *Society of Automotive Engineering (SAE)* dunia yang merupakan event untuk menunjukkan kemampuan merancang, membuat dan memasarkan mobil formula antar mahasiswa di dunia yang dinaungi oleh FSAE dunia. SFJ terdiri dari beberapa event, yaitu *Dynamic Event* dan *Static Event*, *Dynamic Event* terdiri dari *Acceleration*, *Skidpad*, *Autocross*, *Endurance* dan *Fuel Efficiency*, pada *Static Event* terdiri dari *Design Report*, *Cost Report* dan *Business Plan Presentation*.

Pada mobil Sapuangin Speed (SAS) 6 yang berlaga di Jepang ada beberapa kendala, seperti rem, mesin, dan *plenum*. Pada studi ini akan dibahas bagaimana kinerja *Limited Slip Differential* pada kemampuan akselerasi dan manuver mobil. Mobil yang menggunakan mesin 4 silinder

berkapasitas 600cc ini menggunakan mekanisme pembatas slip roda pada gardan. Pada hasil SFJ yang sudah berlangsung pada 4–8 September 2018, mobil SAS 6 mendapatkan peringkat *Over All* 60 dari 93 tim, dimana pada *acceleration* peringkat 62, *skid pad* peringkat 58, *autocross* peringkat 61 dan *endurance* peringkat 60. Jika dilihat dari peringkat *dynamic event* SAS 6 masih jauh dari peringkat 1. Pada event *skid pad*, Bimasakti Racing Team dari Universitas Gajah Mada (UGM) mencatatkan waktu terbaiknya 5,134 detik/putaran dan menempatkan posisinya pada peringkat 10, Joanneum Racing Graz dari UAS Graz (Austria) mencatatkan waktu terbaiknya 4,860 detik/putaran dan menempatkan posisinya pada peringkat 1, sedangkan Sapuangin Speed 6 yang mencatatkan waktu 6,993 detik/putaran menempatkan posisinya pada peringkat 58. Dapat dilihat dari perbedaan waktunya memang tidak signifikan, namun waktu tiap milidetik nya sangat berharga, karena perbedaan waktu yang kecil pun dapat mempengaruhi skor dan peringkat. Dan

Tabel 1. Spesifikasi mobil SAS 6

1	Panjang	2897 mm
2	Lebar	1412 mm
3	Tinggi	1211 mm
4	Wheelbase	1560 mm
5	Trackwidth Depan	1260 mm
	Trackwidth Belakang	1200 mm
6	Berat kendaraan	225 kg
7	Area	1,002 m ²
8	C _D	0,605
9	C _L	0,00868
10	Berat pengemudi	75 kg
11	Peak Power (wheel)	38HP/8200 rpm
12	Peak Torque (engine)	32,5Nm/8300 rpm
13	Cusco LSD Type MZ (Initial Torque)	127,49 – 147,1 Nm
14	LSD Drexler FSAE (Initial Torque)	20-25 Nm
15	Diameter Roda	10 inch
16	Parameter Ban	$\mu(x)$: 2,48
	Ban Depan (Hoosier LC0 6.0x18.0-10)	$\mu(y)$: 2,37 fr: 0,013
17	Ban Belakang (Hoosier R25B 18.0x6.0-10)	$\mu(x)$: 2,32 $\mu(y)$: 2,18 fr: 0,010
	Rasio gardan (ig)	(52/16) 3,25
18	Rasio transmisi (it)	it 1 : (38/14) 2,714
		it 2 : (33/15) 2,200
		it 3 : (37/20) 1,850
		it 4 : (32/20) 1,600
		it 5 : (27/19) 1,421
		it 6 : (26/2) 1,300

dalam ajang ini optimalisasi setiap bagian sangat diperlukan untuk menghasilkan waktu yang maksimal.

Salah satu penyebab mobil sapuangan speed 6 tidak optimal adalah diakibatkan tenaga mesin yang besar tidak dapat tersalurkan dengan baik pada roda, sehingga mobil tidak memiliki gaya dorong/traksi maksimal untuk melawan gaya hambat, seperti gaya rolling, gaya hambat angin. Pemilihan rasio transmisi juga akan sangat berpengaruh pada daya yang dapat disalurkan.

Pada mobil Sapuangan Speed 6 menggunakan pembagi daya *Limited Slip Differential* (LSD). LSD adalah salah satu alat yang bisa menunjang untuk memaksimalkan traksi. LSD kurang lebih sama seperti *Open Differential* (gardan biasa), tetapi pada kondisi roda yang memiliki traksi rendah LSD mampu mentransfer torsi lebih dari open differential. Teori limited slip adalah factor locking dalam presentase, seberapa banyak torsi yang diberikan dapat diteruskan pada satu poros.

Dalam studi ini, dilakukan analisa tentang kinerja penggunaan LSD pada sistem transmisi mobil SAS 6. Langkah pertama harus mengetahui karakteristik mesin Kawasaki ZX6R 600cc standard meliputi kecepatan maksimum, torsi maksimum, daya maksimum, kemudian dilakukan analisa untuk memilih parameter yang tepat. Selain itu dilakukan juga analisa traksi saat belok yang berhubungan dengan pengaruh pemakaian *Limited Slip Differential* (LSD) pada mobil SAS 6 terhadap radius belok lintasan agar dalam perancangan mobil baru untuk kompetisi selanjutnya lebih baik dalam akselerasi dan bermanuver. Hal ini dilakukan untuk mempersiapkan lebih dini dalam menghadapi event *Student Formula Japan 2019* yang akan datang agar mobil

Sapuangan Speed dapat bersaing dengan baik dengan tim-tim papan atas didunia dan di Jepang pada khususnya.

URAIAN PENELITIAN

Pada penyusunan studi ini prosedur penelitian dilakukan dalam empat tahap. Tahap awal, melakukan analisa dengan sumber studi literatur buku, jurnal dan penelitian terdahulu tentang kestabilan arah kendaraan. Selanjutnya adalah penentuan objek mobil yang akan diteliti yaitu mobil formula *Sapuangan Speed 6* dengan spesifikasi seperti pada Tabel 1.

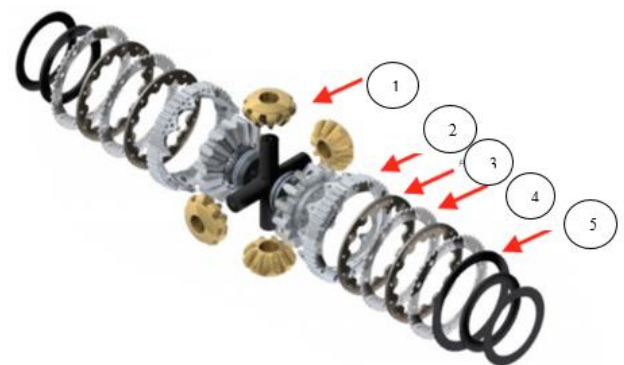
A. LSD Drexler FSAE



Gambar 1. LSD Drexler [7].

Drexler merupakan suatu perusahaan suplaier *part* untuk ajang FSAE, dimana salah satu *part* yang disuplai adalah LSD. Drexler memproduksi suatu LSD khusus yang dapat digunakan tim untuk mengikuti ajang FSAE, dimana spesifikasi yang dimiliki LSD keluaran Drexler ini disesuaikan dengan kebutuhan mobil *formula student*. Dengan berat sekitar 2kg, maksimal torsi yang dapat diberikan 1200Nm, *initial torque* nya 20-25 Nm.

Dari gambar 1 tampak bahwa LSD ini memang didesain khusus untuk FSAE, yang dimana hanya memiliki ukuran kecil dan berat yang lumayan ringan dibandingkan dengan LSD Cusco yang dipakai saat ini. Untuk pengoperasian dan *maintenance* nya dibuat lebih mudah, agar ketika dalam perlombaan LSD ini membutuhkan perlakuan maka akan mudah diselesaikan, semisal untuk menambah oli LSD cukup dengan menambah oli melalui saluran yang ditutup baut yang berada ditengah LSD tersebut.



Gambar 2. Bagian-bagian LSD Drexler [7]

Keterangan:

1. Spider gear and side bevel gear
2. Pressure ring
3. Friction disc
4. Clutch plate
5. Disc spring

Mulai dari tengah yang ditunjukkan oleh panah warna merah, adalah *spider gear* dan *side bevel gear* yang berfur sebagai *open differential*. Jadi komponen utama dari *open differential* adalah bagian tengah ini dimana fungsinya menjadi gardan biasa yang dapat membedakan putaran roda

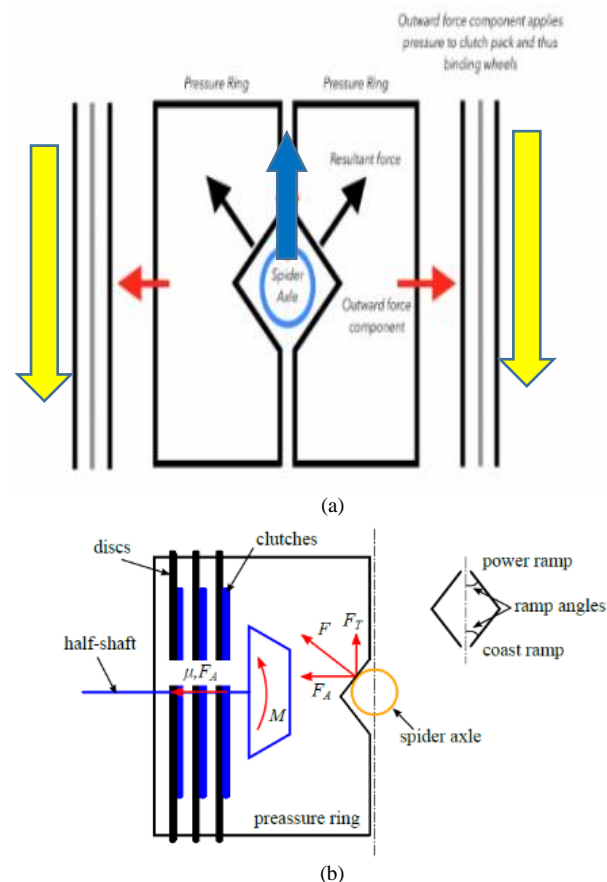
kanan dan kiri ketika mobil berbelok. Ditengah-tengah LSD ada pin (*spider axle*) yang berfungsi sebagai penyambung *spider gear* yang berada didua sisi berbeda. Dan pin ini juga yang pada LSD ini berfungsi sebagai alat untuk mengaktifasi LSD dengan cara menekan *pressure ring* yang diakibatkan putaran *housing*. Kemudian disisi luar *bevel gear* terdapat *pressure ring* yang ditunjuk panah warna merah, *pressure ring* ini merupakan bagian LSD yang terdapat *ramp angle*, tempat pin menekan LSD. Selanjutnya ada kombinasi antara *friction disc* dan *clutch disc*, yang befungsi sebagai kopling. Ada beberapa variasi untuk pemasangan plat ini, seperti *friction disc/clutch plate/friction disc/clutch plate* (0101) 100% lock atau *friction disc/friction disc/clutch plate/clutch plate* (0011) 60% lock, hal ini dilakukan untuk mendapatkan variasi *locking* yang bisa didapatkan dari LSD ini. Dan yang terakhir adalah *disc (cone) spring*, bagian ini berfungsi untuk memberikan tekanan terhadap kopling LSD, dan dari *spring* inilah yang mempengaruhi *initial torque* suatu LSD berdasarkan kekakuan *spring* yang dimiliki.

B. Cara Kerja LSD Drexler

Pada gambar 3 menunjukkan bagaimana pin (*spider axle*) bergerak, panah warna kuning menunjukkan arah putaran *final drive* pada mobil. Ketika panah warna kuning bergerak kebawah dengan torsi sebesar X, maka *spider axle* akan bergerak searah panah berwarna biru dengan torsi sebesar X pula. Akibat adanya *ramp angle*, menyebabkan gaya dorong oleh pin dapat diteruskan ke arah plat kopling sesuai arah panah warna merah dengan besar:

$$F_A = F \cos \theta \quad (1)$$

Dimana: θ = besar sudut *ramp angle*



Gambar 3. (a) (b) Kerja *spider axle* ketika LSD berputar [7]

Ketika *housing* LSD berputar diakibatkan putaran dari *final drive*, *housing* juga akan memutar *pressure*

ring dan *clutch plate*. Akibat dari adanya gerak relatif *pressure ring* ini, maka pin yang berada diantara *ramp angle* dari *pressure ring* akan bergerak berlawanan dengan arah *final drive*. Dan gerakan inilah yang akan menekan *pressure ring* ke arah plat kopling, ketika kopling bagian kanan dan kiri tertekan oleh *pressure ring*, maka akan menyebabkan penyaluran torsi yang sama ke kedua roda mobil. Pada LSD Drexler terdapat beberapa *ramp angel* yang dapat diubah ubah sesuai dengan kebutuhan mobil seperti yang sudah tertera pada gambar diatas, yaitu: 30°, 40°, 45°, 50°, 60°, dan 90° (*open differential*).

C. Perhitungan Torsi, Traksi dan Vmax tiap tingkat Transmisi SAS 6

Tabel 2. Torsi, Traksi dan V Roda tiap Tingkat Transmisi

Torsi Engine (Nm)	RPM engine	it	Ig	r roda (m)	Torsi roda (Nm)	RPM roda	Ft roda (N)	Vmax (m/s)
32,5	8300	2,714	3,25	0,127	286,67	940,99	2144,35	12,52
32,5	8300	2,2	3,25	0,127	232,38	1160,84	1738,24	15,44
32,5	8300	1,85	3,25	0,127	195,41	1380,46	1461,70	18,37
32,5	8300	1,6	3,25	0,127	169,00	1596,15	1264,17	21,24
32,5	8300	1,421	3,25	0,127	150,09	1797,22	1122,74	23,91
32,5	8300	1,3	3,25	0,127	137,31	1964,50	1027,14	26,14

Untuk menentukan Ft (Gaya Traksi) menggunakan persamaan:

$$Ft = \frac{it \times ig \times T_{engine}}{r_{roda}} \eta_t \quad (2)$$

$$\eta_t = 0,95$$

Dan untuk menentukan Vmax tiap transmisi pada saat torsi maksimum menggunakan persamaan:

$$V_k = \frac{ne \times 2\pi r}{ik \times ig \times 60} \quad (3)$$

Peak torsi yang dihasilkan mesin jika disalurkan pada roda akan bernilai seperti pada tabel 2. Pada perbandingan kecepatan 1 dengan perbandingan transmisi yang besar (2,714) menyebabkan rpm yang disalurkan pada poros bernilai kecil, maka torsi poros/roda akan besar dan kecepatan maksimal yang dapat dicapai kecil. Semakin kecil perbandingan transmisi, maka torsi yang disalurkan menuju poros juga akan semakin kecil dan kecepatan yang dapat dicapai semakin besar. Seperti pada transmisi 1, dengan perbandingan 2,714 dapat menghasilkan torsi 286,67 Nm, namun kecepatan maksimal yang dapat dicapai hanya sebesar 12,52 m/s. Berlawanan dengan transmisi 6 yang hanya dapat menghasilkan torsi 137,31 Nm, namun kecepatan maksimal yang dapat ditempuh adalah 26,14 m/s. Data pada tabel 1 ini menunjukkan kemampuan seberapa besar mobil SAS 6 dapat dipacu dan menjadi acuan dalam mendesain mobil SAS 6.

D. Analisa Skid Kendaraan

Mobil akan skid apabila gaya sentrifugal yang terjadi pada kendaraan berbelok lebih besar dari pada gaya gesek antara ban dan permukaan. Maka dari itu dibutuhkan Vmax agar roda tidak skid. Untuk analisa *skid* menggunakan persamaan:

$$V_{fs} = \sqrt{\frac{R_n \cdot g}{W} \left[\frac{\mu \cdot b(W - F_L) - b \cdot F_s - F_d \cdot h \cdot \mu - \mu \cdot M_{pa}}{b \cdot \cos \beta - h \cdot \mu \cdot \sin \beta} \right]} \quad (4)$$

$$V_{rs} = \sqrt{\frac{R_n \cdot g}{W} \left[\frac{\mu \cdot a(W - F_L) - a \cdot F_s - F_d \cdot h \cdot \mu - \mu \cdot M_{pa}}{a \cdot \cos \beta - h \cdot \mu \cdot \sin \beta} \right]} \quad (5)$$

Dari persamaan (4) dan (5) didapatkan Tabel 3 sampai Tabel 5 hasil dari perhitungan *skid*:

Tabel 3. Vfs, Vrs dan Vsmax pada Lintasan *Skidpad* dengan Radius 8,55 meter

Vtarget (m/s)	Vfs (m/s)	Vrs (m/s)	Vsmax (m/s)	Vtarget < Vsmax
11,05820106	13,40036	12,92346	13,10903028	NO SKID
10,95674967	13,4011	12,92286	13,10903028	
10,90782568	13,40145	12,92257	13,10903028	
10,83306937	13,40199	12,92214	13,10903028	
10,75502444	13,40254	12,92168	13,10903028	
7,685236257	13,42119	12,90648	13,10903028	

Tabel 4. Vfs, Vrs dan Vsmax pada Lintasan *Autocross* dengan Radius 4,5 meter

Vtarget (m/s)	Vfs (m/s)	Vrs (m/s)	Vsmax (m/s)	Vtarget > Vsmax
14,52911237	9,251804	8,958579	9,111642552	SKID
14,19803168	9,253979	8,956816	9,111642552	
14,19227447	9,254016	8,956786	9,111642552	
14,14514145	9,254321	8,956538	9,111642552	
14,10548449	9,254577	8,95633	9,111642552	
10,10139035	9,276704	8,938344	9,111642552	

Tabel 5. Vfs, Vrs dan Vsmax pada Lintasan *Endurance* dengan Radius 4,5 meter

Vtarget (m/s)	Vfs (m/s)	Vrs (m/s)	Vsmax (m/s)	Vtarget > Vsmax
15,62725308	9,24423	8,964714	9,111642552	SKID
15,59792519	9,24444	8,964545	9,111642552	
15,56727504	9,244658	8,964368	9,111642552	
15,48026829	9,245276	8,963867	9,111642552	
15,34448366	9,246234	8,963092	9,111642552	
11,9853996	9,267211	8,94607	9,111642552	

Pada Tabel 3 sampai Tabel 5 menunjukkan hasil perhitungan untuk analisa skid mobil SAS 6 pada 3 jenis lintasan *SFJ*. Dari tabel-tabel tersebut dapat dilihat bahwa pada belokan yang memiliki radius terkecil (*autocross* dan *endurance*) yaitu 4,5 meter mobil SAS 6 akan mengalami skid. Pada lintasan *skidpad* yang radiusnya 8,55 meter mobil tidak skid. Nilai Vsmax, yaitu nilai kecepatan ijin agar mobil tidak mengalami skid pada lintasan belok dengan radius 4,5 meter adalah 9,111642552 m/s, sedangkan kecepatan targetnya melebihi kecepatan ijin.

E. Analisa Guling Kendaraan

Kendaraan dalam keadaan kritis mulai akan terguling jika ada salah satu atau dua roda yang terangkat ketika berbelok. Kondisi ini sangat penting untuk diketahui oleh driver agar bisa mengendalikan mobil dengan baik. Untuk analisa skid menggunakan persamaan:

$$V_{fg} = \sqrt{R \cdot g \frac{(b \cdot t_f(W - F_L) - t_f(F_d \cdot h + M_{Ra}) + 2b(F_s \cdot h + M_{Ra}))}{W(2 \cdot b \cdot h \cos \beta + h \cdot t_f \cdot \sin \beta)}} \quad (6)$$

$$V_{rg} = \sqrt{R \cdot g \frac{(a \cdot t_r(W - F_L) + t_r(F_d \cdot h + M_{pa}) + 2a(F_s \cdot h + M_{pa}))}{W(2 \cdot a \cdot h \cos \beta + h \cdot t_r \cdot \sin \beta)}} \quad (7)$$

Dari persamaan (6) dan (7) didapatkan Tabel 6 sampai Tabel 8 berikut:

Tabel 6. Vfg, Vrg dan Vgmax pada Lintasan *Skidpad* dengan Radius 8,55 meter

Vtarget (m/s)	Vfg (m/s)	Vrg (m/s)	Vgmax (m/s)	Vtarget < Vgmax
11,05820106	13,05226	12,74054	12,7759622	NO ROLL
10,95674967	13,05297	12,74119	12,7759622	
10,90782568	13,05332	12,7415	12,7759622	
10,83306937	13,05384	12,74197	12,7759622	
10,75502444	13,05438	12,74246	12,7759622	
7,685236257	13,07254	12,75886	12,7759622	

Tabel 7. Vfg, Vrg dan Vgmax pada Lintasan *Autocross* dengan Radius 4,5 meter

Vtarget (m/s)	Vfg (m/s)	Vrg (m/s)	Vgmax (m/s)	Vtarget > Vgmax
14,52911237	9,103899	8,887931	8,93072075	ROLL
14,19803168	9,106039	8,889864	8,93072075	
14,19227447	9,106076	8,889897	8,93072075	
14,14514145	9,106376	8,890168	8,93072075	
14,10548449	9,106628	8,890396	8,93072075	
10,10139035	9,128401	8,910063	8,93072075	

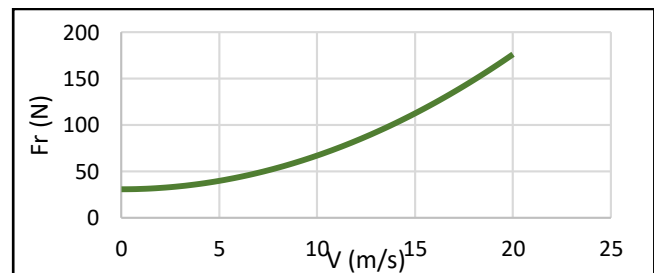
Tabel 8. Vfg, Vrg dan Vgmax pada Lintasan *Endurance* dengan Radius 4,5 meter

Vtarget (m/s)	Vfg (m/s)	Vrg (m/s)	Vgmax (m/s)	Vtarget > Vgmax
15,62725308	9,096446	8,8812	8,93072075	ROLL
15,59792519	9,096653	8,881386	8,93072075	
15,56727504	9,096868	8,88158	8,93072075	
15,48026829	9,097476	8,88213	8,93072075	
15,34448366	9,098418	8,882981	8,93072075	
11,9853996	9,11906	8,901625	8,93072075	

Pada Tabel 6 sampai Tabel 8 menunjukkan hasil perhitungan untuk analisa guling mobil SAS 6 pada 3 jenis lintasan *SFJ*. Dari tabel-tabel tersebut dapat dilihat bahwa pada belokan yang memiliki radius terkecil (*autocross* dan *endurance*) yaitu 4,5 meter mobil SAS 6 akan mengalami guling. Pada lintasan *skidpad* yang radiusnya 8,55 meter mobil tidak guling. Nilai Vgmax, yaitu nilai kecepatan ijin agar mobil tidak mengalami guling pada lintasan belok dengan radius 4,5 meter adalah 8,93072075 m/s, sedangkan kecepatan targetnya melebihi kecepatan ijin.

F. Gaya Hambat Kendaraan

Pada gambar 4. menunjukkan total hambatan yang harus dilawan oleh mobil pada saat melaju pada kecepatan tertentu. Dengan menjumlahkan hambatan udara (Ra) dan hambatan rolling (Rr) didapatkan hambatan total (Fr). Ra didapat dari input data variabel bebas kendaraan yaitu luas penampang *frontal* kendaraan (Af), C_D dan C_L yang didapat dari hasil simulasi yaitu berturut-turut sebesar 1,002m²; 0,605; 0,00868. Dan menggunakan variabel tetap massa jenis udara (p) sebesar 1,2kg/m³, melalui persamaan gaya hambat udara akan didapatkan gaya hambat dengan fungsi kecepatan. Gaya hambat *rolling* didapatkan dari perkalian berat kendaraan dengan koefisien *rolling* (fr), dimana koefisien *rolling* dari roda yang digunakan mobil SAS 6 telah ditentukan oleh produsen roda tersebut sebesar 0,013 untuk ban depan (Hoosier LC0 6.0x18.0-10) dan 0,010 untuk ban belakang (Hoosier R25B 18.0x6.0-10).



Gambar 4. Gaya Hambat Total Kendaraan

G. Perhitungan Tenaga dan Torsi untuk Melawan Gaya Hambat

Gaya hambat total kendaraan (Fr) sama dengan gaya dorong kendaraan yang harus dikeluarkan mesin untuk melawan gaya hambat total (Fr), dari gaya dorong yang

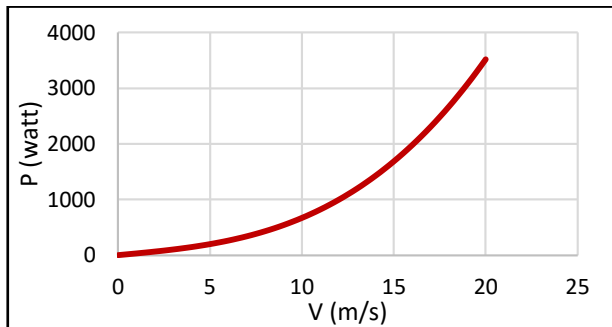
dihasilkan oleh kendaraan dapat diketahui *Road-Load Horse Power* (Rhp) kendaraan dengan menggunakan rumus:

$$Rhp = FxV \quad (8)$$

$$Rhp = (Ra + Rr)xV \quad (9)$$

$$Rhp = (fr.W + \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot A_f \cdot V^2)xV \quad (10)$$

Gambar 5. menunjukkan grafik Rhp kendaraan yang diperlukan untuk melawan gaya hambat total.



Gambar 5. Rhp terhadap Kecepatan Kendaraan.

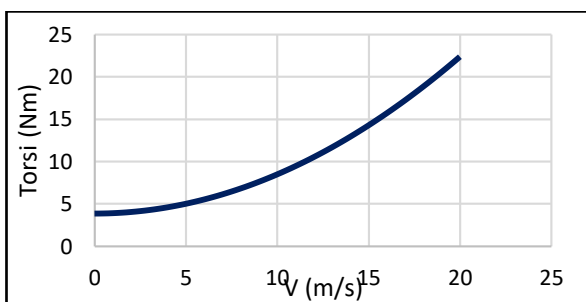
Selain bisa mendapatkan Rhp mobil, dari gaya dorong kendaraan juga bisa didapatkan Torsi roda mobil yang digunakan untuk melawan gaya hambat total kendaraan. Pada gambar 6. merupakan hasil perhitungan torsi roda untuk melawan gaya hambat kendaraan, perhitungan ini didapatkan dari rumus:

$$T_{roda} = Fr \times R_{roda} \quad (11)$$

$$T_{roda} = (Ra + Rr) \times R_{roda} \quad (12)$$

$$T_{roda} = (fr.W + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot A_f \cdot V^2) \times 0,127 \quad (13)$$

Gambar 6. menunjukkan hasil perhitungan torsi roda untuk melawan gaya hambat yang bekerja pada mobil pada setiap tingkat kecepatan kendaraan.



Gambar 6. Torsi roda terhadap Kecepatan Kendaraan

HASIL DISKUSI

Untuk menganalisa pengaruh penggunaan LSD pada mobil SAS 6, dilakukan perhitungan pada belokan kritis dilintasi *SFJ*. Dari hasil perhitungan *skid* dan guling belokan kritis terjadi di *hairpin turns* pada *autocross* dan *endurance*. Berdasarkan *FSAE rules 2017-2018 hairpin turns* memiliki radius minimum 4,5 meter. Pada analisa *LSD* ini akan dilakukan pada belokan *hairpin turns* pada radius 4,5 meter, 5 meter, 5,5 meter, 6 meter, 6,5 meter, 7 meter, 7,5 meter, 8 meter dan 8,5 meter, dimana *hairpin turns* merupakan lintasan berbentuk setengah lingkaran.

H. Analisa LSD

Untuk menentukan kapan LSD dibutuhkan pada *hairpin turns*, maka perlu dilakukan analisa perhitungan pada

beberapa radius untuk menentukan kapan roda bagian belakang terjadi *skid* ketika roda terangkat dan analisa ini menggunakan kecepatan maksimal mobil pada saat *power peak engine* yaitu 18,37 m/s, hal ini disebabkan untuk mendapatkan juara 1 pada *endurance* kecepatan harus lebih tinggi dari juara 1 *endurance* (15,627 m/s).

Pada radius 4,5 meter ($V=18,37$ m/s):

$$F_{cr} = \frac{a}{a+b} \times \frac{WxV^2}{gxR} \quad (14)$$

$$Wr = \frac{a}{a+b} \times xW \quad (15)$$

$$a = \frac{F_{cr} - F_{gr}}{Wr/g} \quad (16)$$

$$\tan \theta = \frac{(Wr \cdot \frac{tr}{2} - F_{cr} \cdot h)}{(F_{cr} \cdot \frac{tr}{2} + Wr \cdot h)} \quad (17)$$

Jika nilai a positif, maka mobil akan mengalami *skid* pada saat roda mengangkat, dan mobil membutuhkan LSD. Dan θ adalah besar sudut angkat suatu mobil pada saat mobil tersebut berbelok dan terjadi *rolling*. Dari hasil perhitungan berdasarkan hasil *SFJ 2018*, didapatkan tabel 9.

Dari tabel 9. dapat diketahui dengan kecepatan 18,37 m/s mobil akan mengalami *skid* ketika roda dalam terangkat pada semua radius. Maka mobil membutuhkan LSD agar dapat tetap melaju kedepan pada semua radius. Karena ketika tidak menggunakan LSD, roda belakang mobil tidak memiliki *power* dan torsi untuk melaju ke depan. Sehingga roda mobil kehilangan traksinya dan gaya terbesar yang bekerja adalah gaya kesamping (sentrifugal) pada roda belakang.

Tabel 9. Perhitungan Percepatan Roda Belakang

R belok (m)	V mobil (m/s)	Fc belakang mobil (N)	W belakang mobil (N)	F gesek roda belakang mobil (N)	a roda searah Fc (m/s ²)	tan θ	Sudut angkat roda (θ°)	Ket
4,5		11694,25			0,694	-0,325	17,999	LSD
5		10524,82			0,597	-0,309	17,181	LSD
5,5		9568,021			0,517	-0,294	16,367	LSD
6		8770,686			0,451	-0,278	15,557	LSD
6,5	18,37	8096,018	1530,36	3336,185	0,395	-0,263	14,750	LSD
7		7517,731			0,347	-0,248	13,948	LSD
7,5		7016,549			0,305	-0,234	13,151	LSD
8		6578,015			0,269	-0,219	12,358	LSD
8,5		6191,073			0,237	-0,205	11,570	LSD

Selanjutnya adalah menghitung seberapa besar pengaruh penggunaan LSD pada power output, torsi output dan kecepatan yang dapat dicapai oleh mobil pada saat berbelok pada *hairpin turns*. Power output mesin yang digunakan adalah saat *peak torque* transmisi 3, yaitu sebesar 27819,67 watt. Maka hasil distribusi power yang melalui LSD dengan *peak power* saat transmisi 3 seperti pada tabel 10.

$$P_{tr} = P_1 + P_2 \quad (18)$$

$$T_{tr}\omega_{tr} = T_1\omega_1 + T_2\omega_2 \quad (19)$$

$$P_r = (R_r + R_a)xV \quad (20)$$

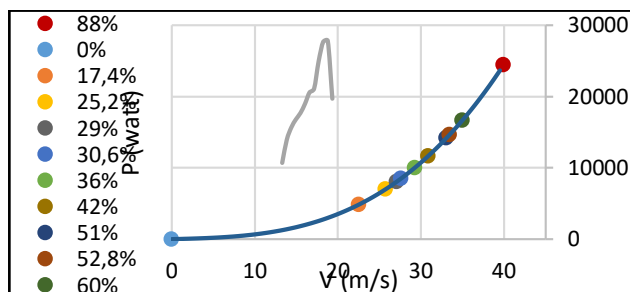
$$P_r = (W \cdot fr + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot A_f \cdot V^2)xV \quad (21)$$

Gambar 7. merupakan pengaruh *locking percentage LSD* terhadap tenaga keluaran mesin yang bekerja pada roda untuk melawan hambatan total mobil. Dari gambar 4.5 dapat diketahui semakin besar nilai *locking percentage LSD* maka semakin besar tenaga yang dapat disalurkan pada roda yang memiliki hambatan (roda luar). Nilai power keluar yang dapat disalurkan menuju roda luar paling kecil adalah ketika

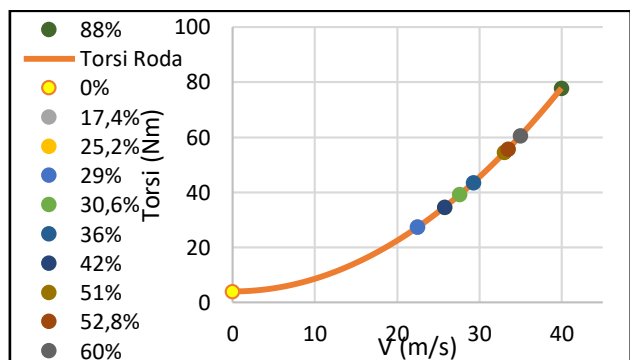
Tabel 10. Perhitungan Pengaruh LSD

Locking percentage clutch (%)	Locking percentage ramp (%)	Locking percentage total LSD (%)	Power roda luar (watt)	Kecepatan roda luar (m/s)	Torsi roda luar (Nm)
0,6	0	0	0	0	3,884
	0,29	0,174	4840,622	22,51633	27,303
	0,42	0,252	7010,556	25,76714	34,553
	0,51	0,306	8512,818	27,6251	39,136
	0,6	0,36	10015,08	29,26899	43,456
	0,88	0,528	14688,78	33,492	55,699
1	0	0	0	0	3,884
	0,29	0,29	8067,703	27,100	37,808
	0,42	0,42	11684,26	30,907	48,010
	0,51	0,51	14188,03	33,088	54,457
	0,6	0,6	16691,8	35,020	60,534
	0,88	0,88	24481,31	39,989	77,750

locking percentage 0%, yaitu 0 watt yang dapat menghasilkan kecepatan roda luar 0 m/s. Dan nilai power roda luar terbesar yang didapat adalah ketika locking percentage 0,88%, yaitu 24481,31 watt yang dapat menghasilkan kecepatan roda luar 39,989 m/s. Semakin besar locking percentage, maka semakin kecil penurunan kecepatan roda luar.



Gambar 7. Grafik Pengaruh LSD pada Power.



Gambar 8. Grafik Pengaruh LSD pada Torsi.

Pada Gambar 8. adalah pengaruh locking percentage LSD terhadap torsi roda yang bekerja untuk melawan hambatan total mobil. Nilai torsi mesin terkecil yang didapat roda luar adalah ketika locking percentage 0%, yaitu 3,884 Nm pada saat kecepatan mobil 0 m/s. Dan nilai torsi roda luar terbesar adalah ketika locking percentage 0,88%, yaitu 77,750 Nm pada saat kecepatan mobil 39,989 m/s. Dari gambar 4.9 dapat diketahui juga bagaimana untuk memilih jenis LSD yang akan digunakan. Pemilihan LSD didasarkan pada 2 hal, yaitu initial torque dan locking percentage yang dapat dihasilkan. LSD harus aktif ketika salah satu roda mobil dalam keadaan terangkat, maka initial torque LSD adalah 27 Nm, agar ketika menggunakan locking percentage (17,4%) paling kecil dengan power keluaran engine minimal pada peak power transmisi 3 LSD dapat aktif.

KESIMPULAN

Limited Slip Differential (LSD) dapat membantu mobil SAS 6 tetap memiliki tenaga dan torsi untuk melawan gaya hambat mobil ketika salah satu roda terangkat, semakin besar locking percentage LSD yang digunakan, maka semakin besar pula tenaga dan torsi yang dapat disalurkan. Terdapat 2 hal yang menjadi acuan pemilihan LSD yang sesuai untuk digunakan pada mobil SAS 6, yaitu initial torque dan locking percentage LSD. Maka initial torque LSD adalah 27 Nm agar ketika menggunakan locking percentage paling kecil (17,4%) dengan power keluaran minimal pada peak power saat transmisi 3 LSD dapat aktif.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] I. N. Sutantra dan B. Sampurno, "Teknologi Otomotif : Edisi Kedua". Guna Widya., Surabaya (2010)
- [2] J. Allen, "4-Wheeler's Bible". MBI Publishing Company, 380 Jackson Street, Suite 200, St.Paul., USA (2002)
- [3] T. R. Pradana, "Analisa Perilaku Arah Kendaraan dengan Variasi Posisi Titik Berat, Sudut Belok dan Kecepatan Pada Mobil Formula Sapuwingin Speed 3". Teknik Mesin ITS., Surabaya (2016)
- [4] Formula SAE rules by SAE International. (2018, Oktober 07). [Online]. Available: <https://www.jsae.or.jp/formula/en/>
- [5] J. Rendl, L. Zilli, dan F. Sedláček. "Investigation of driving properties for Formula Student". Applied Mechanics 2018 Publishing. Myslovice, Czech Republic (2018)
- [6] Cusco Japan., Ltd. (2018, Oktober 07). [Online]. Available: <https://www.cusco.co.jp/en/>
- [7] Motosport, Drexler. (2018, Oktober 07). [Online]. Available: <https://eng.drexlerautomotive.com/motorsport/formula-student>